

Zárójelentés az OTKA 43382 sz. témához

Budapest, 2007.05.20.

1. Az RTK mérés alapelve

Ismert, hogy a műholdas helymeghatározás alapja legalább négy, nem egy síkban lévő, ismert pályán keringő műholdra történő egyidejű távolságmérés. A mérésekből térbeli ívmetszés segítségével történik a helymeghatározás, jellemzően néhány méteres pontossággal. Ez a pontosság (pontatlanság) a geodéziai feladatokhoz általában nem elegendő, nekünk néhány cm-es pontosságra van szükségünk. A műholdas helymeghatározás geodéziai alkalmazási lehetőségeit már a kezdet kezdetén felismerték. Azóta a technológia rengeteget fejlődött, újabb és újabb mérési módszerek, technikai megoldások láttak napvilágot. Ugyanakkor az alapelvek, alapproblémák mit sem változtak.

1.1 Abszolút vagy relatív helymeghatározás

Egyetlen vevőt használva a helymeghatározás eredménye a vevőantenna három koordinátájának (pillanatnyi) értéke egy kiválasztott vonatkozási rendszerben. Ezek a koordináták

- a φ ellipszoidi szélesség, a λ ellipszoidi hosszúság és a h ellipszoid feletti magasság egy nemzetközileg elfogadott alakú, nagyságú és geocentrikus elhelyezésű forgási ellipszoidhoz képest. Az 1984-ben elfogadott ellipszoid mint vonatkozási rendszer a WGS-84 (World Geodetic System = geodéziai világ-rendszer) nevet viseli;
- az X , Y , Z térbeli derékszögű koordináták ugyanezen ellipszoid tengelyei által megvalósított koordináta-rendszerben.

Az ellipszoidi és a térbeli derékszögű koordináták egymásba átszámíthatók. A helymeghatározás eredménye a geocentrumból a vevőantennára mutató vektor. A (geocentrikus) koordinátákat szolgáltató helymeghatározást **abszolútnak** nevezzük.

Ha két vevő órája szinkronizált és a két vevő egyidejűleg ugyanazokat a műholdakat észleli, akkor a helymeghatározás eredménye a két vevőantenna három-három koordinátájának (pillanatnyi) különbsége. Általában az egyik vevő koordinátái ismertek és változatlanok, a másik vevő helyzetét pedig az ismert helyzetű vevőhöz képest határozzuk meg. Az eredmény ebben az esetben az ismert pontból a meghatározandó pontra mutató vektor. A koordináta-különbségeket szolgáltató helymeghatározást **relatívnak** nevezzük.

1.2 Statikus vagy kinematikus helymeghatározás

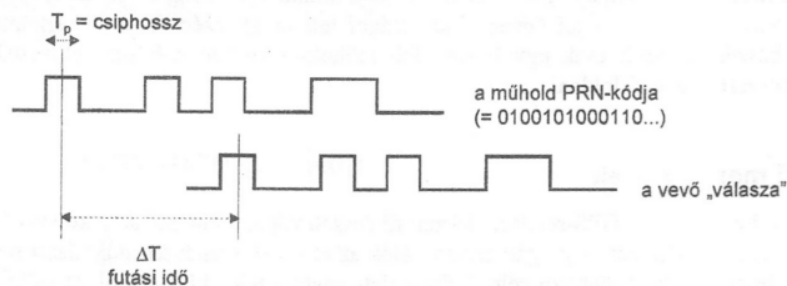
Ha az észlelés ideje alatt a vevő mozdulatlan, akkor **statikus** helymeghatározásról, ha a vevő mozog, ilyenkor természetesen több pontot határoz meg, akkor **kinematikus** helymeghatározásról beszélünk.

1.3 Valós idejű vagy utólagos feldolgozás

A **valós idejű** (*real-time*) feldolgozás a mérések eredményeiből azonnal szolgáltat helymeghatározó adatokat. **Utófeldolgozással** (*post-processing*) a mérés helyszínén általában több helyen rögzített adatokat együttesen dolgozzák fel az irodában az észlelési programot követően.

1.4 Kódmérés vagy fázismérés

A helymeghatározás alapja a távolság-meghatározás. A műholdak folyamatosan sugároznak jeleket a földi vevőberendezések számára; a sugárzott jel mind időmérési (kódmérési), mind fázismérési távolság-meghatározásra alkalmas.



1-1. ábra A kód mérés elve

1.4.1 Távolság-meghatározás kód méréssel

Ha a műhold és a földi vevő pontosan ugyanabban a pillanatban állít elő egy-egy impulzust, és megmérjük, hogy a vevő saját jeléhez képest mekkora késéssel érkezett a vevőbe a műhold jele, akkor ki tudjuk számítani a vevő távolságát a műholdtól (feltételezzük, hogy a rádióhullámok terjedési sebességét ismerjük). A műhold valójában nem egyetlen impulzust, hanem kódolt jelsorozatot sugároz, amelyet a vevő „ismer” és a vevő a teljes kód mentén vizsgálja az időkülönbséget. Ezért nevezzük az időméréssel történő távolságmérést kód mérésnek.

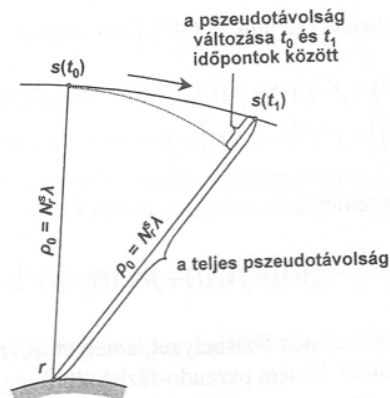
A megoldás nagy előnye, hogy a műholdak adójának nagyon kis teljesítménnyel elég sugározni, a vevő ennek ellenére hatékonyan ki tudja választani a műhold jelét a háttérzajból. A kód mérés további jellemzője, hogy a másodperc tört része alatt meg lehet mérni a műhold-vevő távolságot, ez nagyon fontos a navigációs alkalmazások területén. A kód mérés felbontása (pontossága) geodéziai szempontból meglehetősen szerény, mindössze néhány méter.

1.4.2 Távolság-meghatározás fázisméréssel

A fázisméréses távolságmeghatározás alapja az elektromágneses sugárzás fázishelyzetének megmérése. A fázisméréses távmérés alapképlete:

$$D = N\lambda + D_m$$

ahol D a mért távolság, N az egész fázisciklusok száma, λ a mérőjel hullámhossza és D_m az ún. maradék távolság. GPS-helymeghatározás esetén a mérőhullám hossza (a moduláló frekvencia) az időben állandó, kb. 20 cm. A maradék távolságot közvetlenül, (a beérkező jel és egy, a vevőben előállított ún. referenciajel fáziskülönbségének megmérése útján,) néhány milliméteres pontossággal mérni tudjuk, ugyanakkor az egész ciklusok számának meghatározása igen sok nehézséget okoz.



1-2. ábra A fázismérés elve

Amikor a GPS-vevő bekapcsolása után „rákapcsolódik” egy műholdra, akkor mérésttechnikai sajátosságokra visszavezethetően ez egy olyan időpillanatban történik, hogy a fenti képletben a maradék távolság értéke zérus, így a műhold-vevő távolság a hullámhossz, egyelőre ismeretlen egész számú többszöröse. Ezután ideális esetben a vevő folyamatosan veszi az adott műhold jeleit és a műhold, illetve a vevő mozgásának következtében folyamatosan méri a műhold-vevő távolság változásának értékét. A fáziskülönbség mérésekor a vevő a teljes fázisciklusokat is számolja: egy-egy ciklusnyi változás a műhold-vevő távolság egy hullámhossznyi változását jelent. A műholdra történő rákapcsolódás időpontjára vonatkozóan a hullámhossz egész számú többszöröse továbbra is ismeretlen, ezt a problémát nevezik **ciklus-többsértelműségnek**. Ideális esetben ez a műholdra történő mérés teljes időtartamában állandó. A ciklusszám a mérés során néhányszor megszakadhat, ezt a **ciklusugrásnak** nevezett hibajelenség okozza.

1.4.3 Inicializálás, On-the-Fly módszer

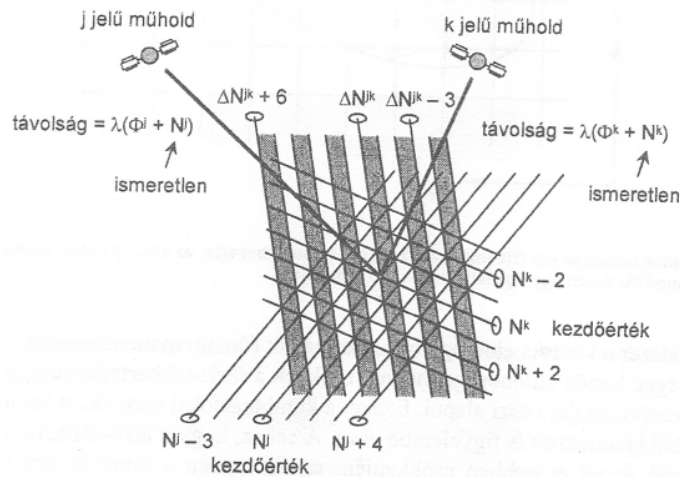
A ciklus-többsértelműség feloldása nagy számú fölös mérés birtokában, statisztikai próbák segítségével történik. Gondoljuk csak végig: az alapkérdés az, hogy a jellemzően 20-25 ezer km-es műhold-vevő távolság hányszorosa a kb. 20 cm-es hullámhossznak?

A geodéziában szokásos eljárás szerint a feladat megoldásának alapja a legkisebb négyzetek módszere. Minden egyes méréshez felírunk egy ún. közvetítő egyenletet, amelyben a mérések és az egyelőre ismeretlen paraméterek között teremtünk matematikai kapcsolatot. Mérésnek tekintjük minden egyes időpontra és műholdra vonatkozó kettős különbséget (lásd később), ismeretlenek pedig a vektor három koordináta összetevője és a ciklustöbbsértelműségek értékei. Első lépésben a jól ismert összefüggések segítségével meghatározzuk az ismeretlenek legvalószínűbb értékét. Mivel ekkor a ciklustöbbsértelműségek még valós, de nem egész számoknak adódnak, ezt a megoldást nevezzük ún. *float* megoldásnak.

A második lépésben feltételezzük, hogy a ciklustöbbsértelműségek egész számok, vagyis a *float* megoldás „környezetében” felvesszünk néhány olyan helyzetet, amikor a ciklustöbbsértelműségek értékét egész számra kerekítjük. Kiszámoljuk így a vektorkomponensek értékét. A nagyszámú fölös mérés birtokában az egyes mérésekhez tartozó javítások súlyozott négyzetes átlagával jellemezhetjük a meghatározott ismeretlenek és a mérések összhangját. Általában van egy legjobb megoldás, ez lesz az ún. *fix* megoldás. Egy bizonyos határig igaz, hogy minél több a fölös mérések száma, annál könnyebben és biztosabban lehet a *fix* megoldást meghatározni.

Megjegyezzük, hogy a ciklustöbbsértelműség feloldásának sikerességét a *ratio*-nak nevezett mennyiséggel jellemezzük. Ez a második legjobb megoldás és a legjobb megoldás középhibájának hányadosa. Minél nagyobb ez az érték, annál biztosabb a megoldás. Nincs egyértelmű

szabály arra nézve, hogy a *ratio*-nak mennyinek kell lennie, sőt a *ratio* értéke némileg szoftverfüggő is. A szakirodalom és a gyakorlati tapasztalatok szerint az értéke legyen legalább 2-4. Ha a *ratio* értékét a szoftverünk, vagy mi magunk alacsonynak találjuk, akkor legbiztosabb megoldás a vektor újramérése. Megjegyezzük, hogy a *float* megoldás is gyakran ad jó megoldást, de erre nézve nincs semmi garancia.



1-3. ábra Ciklus-többértelműség feloldása

A ciklustöbbértelműség feloldásának hatékonysága a szoftverek máig tartó fejlesztésével folyamatosan javul. Kétfrekvenciás vevőkkel, akár egy-két perces mérés is elegendő. Ezt használják ki az RTK műszerek, ahol a ciklustöbbértelműség feloldását maga a GPS-vevő végzi el. A valós időben történő megoldást nevezzük inicializálásnak. Az inicializálás akár mozgás közben is elvégezhető, ezt nevezzük *on-the-fly* („röptében”, mozgás közben) módszernek. Az inicializálás gyorsasága alapvető jelentőségű az RTK-módszer alkalmazásának területén, a gyorsaság sok mindentől függ, többek között a vektor hosszától, az észlelt műholdak számától, az ionoszféra állapotától, a méréseket terhelő zajtól. Jó tudni, hogy a ciklustöbbértelműségek értékét a vevők menet közben folyamatosan ellenőrzik. A téves inicializálás a szerző tapasztalatai szerint nagyon ritka, de persze soha nem lehet teljes biztonsággal kizárni. Általában igaz, hogyha néhány perc alatt, azaz könnyen és gyorsan sikerül az inicializálás, akkor nyugodtak lehetünk. A GPS-technika geodéziai alkalmazásáról szóló szakmai ajánlás is előírja, hogy alappontsűrítés esetén ellenőrzésül a mérést új inicializálást követően (min. 15 perc elteltével) ismételjük meg. Ha az inicializálás hosszú percek alatt sem, vagy csak igen nehézkesen sikerül, akkor még fokozottabban szükséges ellenőrizni a méréseinket. Hasonló esetben nem lehet sokat tenni, célszerű a mérést máskor végezni (más műholdgeometria és/vagy légköri viszonyok mellett), illetve a GPS-mérések számára kedvezőbb helyen.

1.5 A méréseket terhelő hibákról

A geodéziai pontosság elérése érdekében mindig relatív helymeghatározást végzünk. A helymeghatározás legtöbbször **kettős különbségek** alapján történik. Először képezzük két vevő méréseinek ugyanarra a műholdra vonatkozó (egyszeres) különbségét, majd kiválasztunk egy referencia műholdat és az erre vonatkozó egyszeres különbség értékét kivonjuk a többi egyszeres különbség értékéből, így kapjuk meg a kettős különbségeket. A kettős különbségek nagy előnye, hogy a méréseket terhelő legtöbb szabályos hiba hatását kiküszöbölhetjük. Megjegyezzük, hogy bizonyos esetekben a hármas különbségeket is használjuk, amely két különböző időpontra vonatkozó kettős különbség különbsége. Már az egyszeres különbségek képzéséből belátható, hogy

csak azoknak a műholdaknak van szerepe a geodéziai helymeghatározásban, amelyeket mindkét vevő észlel.

1.5.1 Az időadatok hibája

Ezalatt a műholdak óraigazítatlanságát és a vevők órahibáját értjük. A geodéziai gyakorlat szempontjából nincs igazán nagy jelentőségük, hiszen a geodéziai gyakorlatban alkalmazott kettős különbségek módszerével a hatásukat teljes mértékben ki tudjuk küszöbölni.

1.5.2 A pályaadatok hibája

Ismert, hogy a helymeghatározáshoz ismerni kell a műholdak pillanatnyi helyzetét. A műholdak pillanatnyi koordinátáit leggyakrabban a fedélzeti pályaadatok alapján számítjuk ki. A szakirodalom szerint ezt néhány méteres pontossággal tudjuk elvégezni. Szintén a kettős különbségek módszerének alkalmazásával ez a hibahatás csaknem teljes mértékben kiküszöbölhető. (Megjegyezzük, hogy speciális feladatok esetében van értelme ún. precíz pálya és idő adatokkal dolgozni. Precíz adatokkal mind a műhold-koordináták, mind az órajavítások (távolság egységben kifejezve) néhány cm-es pontossággal adhatók meg. Hosszú (50 km-nél hosszabb) vektorok utófeldolgozással történő meghatározása esetén szoktak precíz adatokkal dolgozni, amely lehetőséget a legtöbb feldolgozó szoftver támogat. A hazai GNSS-infrastruktúra ismeretében manapság ilyen hosszú vektorok meghatározása ritkán indokolt.)

1.5.3 A terjedés közegének hatása

A számítások egyszerűsége kedvéért azt szokás feltételezni, hogy a műhold által sugárzott jelek egész pályájuk mentén az elektromágneses sugárzás vákuumbeli terjedési sebességével haladnak. A műholdak 20 ezer km-es pályamagassága miatt a jelek útjuk nagy részét valóban vákuumban teszik meg, de a vevőbe érkezésük előtt áthaladnak a földi légkörön, miközben sebességük nem elhanyagolható mértékben módosul. A GPS-jelek szempontjából a földi légkör két, egymástól lényegesen eltérő tulajdonságú rétegből áll. A magasabban (40 km és 1000 km határok között) elhelyezkedő **ionoszférában** elsősorban a Nap ionizáló ultraibolya sugárzásának hatására elektromos töltésű részecskék vannak, amelyek a GPS-jelek tartományában a különböző frekvenciájú rádióhullámok terjedési sebességét eltérő mértékben módosítják. Az ionosféra tehát a deciméteres rádióhullámok terjedése szempontjából diszperzív közeg, törésmutatója a sugárzás frekvenciájától (is) függ.

Az ionosféra hatása többféleképpen is figyelembe vehető, mi most csak a gyakorlati geodéziai szempontból jelentős módszerekkel foglalkozunk:

- **Számítás útján.** A legegyszerűbb GPS-vevők az ionosféra hatását a *Klobuchar*-féle modell útján veszik figyelembe. A modell meglehetősen egyszerű, paramétereit a GPS-műholdak sugározzák. A tapasztalatok szerint a hatás kb. 70-80 százaléka írható így le, ami geodéziai szemmel nézve szerény, néhány méteres pontosságot tesz lehetővé.
- **Elhanyagolás útján.** Relatív helymeghatározást feltételezve, átlagos körülmények között, kb. 10 km-es távolságig a hatás két vevővel végzett mérések különbségéből kiesik. Ezért nem javasolt egyfrekvenciás vevőkkel 10 km-nél hosszabb vektorokat mérni, illetve ezért vannak az OGPSH pontok átlagosan 10 km-es sűrűségben.
- **Kiküszöbölés útján,** a hatás frekvenciafüggőségének felhasználásával. Említettük, hogy az ionosféra hatása függ a mérőjelek frekvenciájától. Ezért két különböző frekvencián végzett távmérés megfelelő lineáris kombinációjával a hatás teljes mértékben kiküszöbölhető. Ezért lehetséges kétfrekvenciás vevőkkel 10 km-nél hosszabb vektorokat is pontosan mérni.

A légkör legalsó 40 km vastagságú rétege, a **troposféra** nem diszperzív a deciméteres rádióhullámok terjedése szempontjából, törésmutatója a levegő hőmérsékletétől, nyomásától és a levegőben jelen lévő vízgőz részleges nyomásától (az ún. parciális párányomástól) függ. Megje-

gyezzük, hogy a hőmérséklet és a (száraz) nyomás térbeli eloszlását, valamint jelkésleltető hatását (a teljes hatás kb. 90 százalékát) egyszerű modellekkel, lényegében hibátlanul le tudjuk írni. A légkörben található vízgőz és emiatt a hatása is nagyon nehezen modellezhető, ezt jobb híján a különbségképzés módszerével csökkenthetjük.

1.5.4 A jelek vételével kapcsolatos hibák

A **ciklusugrásról** már a fázismérés ismertetésekor írtunk. Jellemzően tereptárgyak okozzák a ciklusugrást, ezért is fontos a GPS-mérésekhez, hogy az égbolt tisztán látszódjon. Általában egy-egy ciklusugrás nem jelent komoly problémát. A ciklusugrások kimutatására és hatásukkal a mérések megfelelő javítására a szakirodalomból számos hatékony algoritmus ismert.

A vevőantenna elektronikus vonatkozási pontja (az ún. fáziscentrum) általában nem esik az antenna geometriai középpontjára, illetve az antennamagasság méréséhez az antenna burkolatán megjelölt síkra. A hatás kiküszöbölése érdekében **antenna fáziscentrum** modelleket használnak, amelyek jellemzően egy-két cm-es pontossággal tudják a hatást figyelembe venni. A fáziscentrum külpontosság ennek ellenére a mérések egyik igen veszélyes hibaforrása, mivel gyakran a vevők (szoftverek) nem ismerik a mérés során alkalmazott összes antenna fáziscentrumának modelljét. Helytelenül, vagy egyáltalán nem alkalmazott fáziscentrum modellek akár deciméteres hibát is okozhatnak! A hiba hatását csökkentheti, ha valamennyi antennára vonatkozóan az antenna burkolatán található jelet mérés előtt az északi irányba fordítjuk.

A **többutas terjedés** (*multipath*) akkor lép fel, ha a műhold jele az álláspont környezetében lévő tereptárgyakról visszaverődve is a vevőbe juthat. A vevőt közvetlenül elérő (ún. direkt terjedésű) és a visszaverődött jelek interferenciája mindenképpen hibával terhelt távolságot ad eredményül. Gyakorlatban ez ellen lényegében egyetlen megoldás lehetséges: a GPS-mérések számára ideális helyen, tehát visszaverő felületektől távol célszerű a méréseket végezni. Ciklikus hibahatása miatt a többutas terjedés a gyors mérések (pl. RTK) eredményeire különösen veszélyes lehet.

Interferencia zavarok. A Nemzetközi Rádió Szabályzat szerint az 1559-1610 MHz közötti frekvenciatartomány az űrből a Földre irányuló rádiónavigáció számára van fenntartva. Sajnos még mindig vannak ebben a tartományban engedéllyel rendelkező frekvenciahasználók, illetve nagyon gyakori az engedély nélküli, esetleges nem is tudatos használata a rádiónavigáció céljaira fenntartott frekvenciatartománynak. Ilyen helyzetben a GPS-vevők lényegében használhatatlanok, nem látnak egyetlen műholdat sem, holott az égboltra való kilátást látszólag semmi sem akadályozza. A jelenség felismerését megnehezíti, hogy az illetéktelen frekvenciahasználat az időben nem állandó. Interferencia zavar, vagy erre utaló jelenség észlelésekor kérünk minden felhasználót, hogy ezt a FÖMI Kozmikus Geodéziai Observatóriumához, a honlapjukról letölthető nyomtatvány segítségével bejelenteni szíveskedjen! Több olyan eset is előfordult már, hogy hasonló bejelentést követően az interferencia forrását szakemberek megtalálták és megszüntették.

1.5.5 A műholdgeometria hatása

A mérések pontosságát az előbb felsorolt óhatatlan mérési hibákon kívül a helymeghatározás geometriája is befolyásolja. Geodéták számára ez ismert jelenség, ezért nem foglalkozunk vele részletesen. Megjegyezzük, hogy a geodéziában szokásos relatív mérésekre gyakorolt hatása meglehetősen összetett, továbbá, hogy a műholdgeometria hatása nem igen javítható. Gyakorlatban alkalmazott módszer, hogy a pontokat ellenőrzésül legalább 15 perc elteltével (általában különböző műholdgeometria mellett) ismételtlen meghatározzák. A mérés helyén és idején várható műholdgeometriáról az előrejelző program révén időben tudomást szerezhetünk.

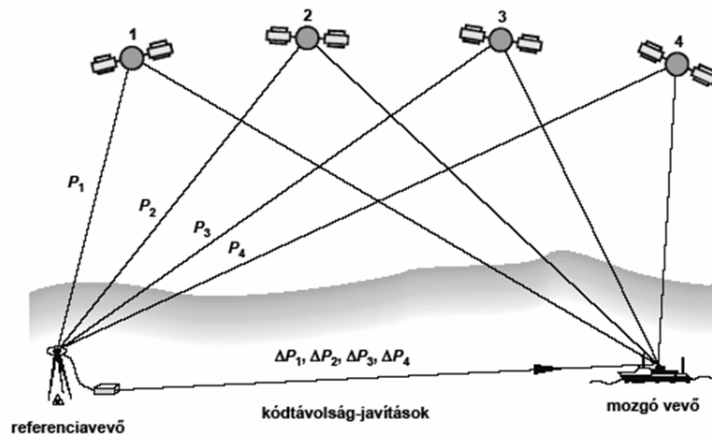
1.6 Mérés módszerek áttekintése

1.6.1 Abszolút helymeghatározás

A legtöbb GPS-felhasználó ezt a mérési módszert alkalmazza. A vevők kód-méréssel határozzák meg a helyzetüket, semmilyen korrekciót nem használnak ehhez. Az abszolút helymeghatározás jellemző pontossága ma 5-10 méter, ez a GPS korszerűsítésével biztosan javulni fog. Megjegyezzük, hogy abszolút helymeghatározásra a professzionális GPS-vevők is képesek.

1.6.2 DGPS korrekciók földi adattovábbítással

Van egy (vagy több) referenciavevőnk, amely antennájának pontos koordinátái ismertek. Ebből és a műholdak koordinátaiból kiszámítható a műhold-vevő távolságok „kell” (vagy számított) értéke, melyet a referencia vevő „van” (mért) távolságaival összehasonlítva kapjuk a műhold-vevő távolságok hibáit. Ezek a hibák, szubméteres pontosságot feltételezve nagyobb területen (pl. 100 km sugarú területen) állandók, ezért ellentett előjellel figyelembe véve a mozgó vevő méréseinek javításaként (korrekciójaként) használhatók. A kódtávolságok korrekciót többféle kommunikációs csatornán keresztül juttathatjuk el a felhasználók felé (URH adó, RDS vagy GSM szolgáltatás...) ma leginkább az internetes továbbítás tűnik a legjobb megoldásnak. Megjegyezzük, hogy Magyarországon a FÖMI Kozmikus Geodéziai Obszervatóriumában üzemelő GNSS szolgáltató központ szolgáltat kódkorrekciókat az egész ország területére, NTRIP technológiára alapozva. A rendszerrel elérhető pontosság a gyakorlati tapasztalatok szerint 1-2 méter.



1-4. ábra DGPS-technika

1.6.3 DGPS korrekció műholdról

Az előző pontban bemutatott módszerhez nagyon hasonló módszerről van szó, csak a korrekciók továbbítása geoszinkron pályán keringő műholdakon keresztül történik. Megjegyezzük, hogy bizonyos rendszerekben a kódkorrekciókat felbontják a különböző összetevőkre (pályahiba, műhold órahiba, légköri hatások), így a szolgáltatással jóval nagyobb terület fedhető le úgy, hogy a referencia vevők számát nem kell lényegesen növelni. Két ilyen jellegű szolgáltatásra hívjuk fel a figyelmet: (1) **Omnistar**, évek óta stabilan működő szolgáltatás, igénybevételéhez előfizetői díjat kell fizetni, az adatokat egy speciális rádiómodem veszi. Ez utóbbit rendszerint egybeépítik a GPS-antennával. (2) **EGNOS**, amely ingyenes szolgáltatás, sajnos évek óta csak kísérleti fázisban működik, tapasztalataink szerint meglehetősen szerény teljesítménnyel. A korrekciókat a GPS-frekvencián keresztül továbbítják, így a GPS-vevő egyik csatornájával a geoszinkron pályán keringő műhold jeleit veszi. A rendszer általános elnevezése WADGPS (*Wide Area Differential GPS*), Európa területére tervezett és részben megvalósított rendszer elneve-

zése az EGNOS, Észak-Amerika területén működő rendszer a WAAS. Megjegyezzük, hogy a WADGPS rendszerek nemcsak a pontosságot fokozzák, hanem a rendszer integritását (önellenőrző képességét) is, amely az élet és vagyonbiztonság szempontjából kritikus alkalmazások (pl. légi közlekedés) egyik alapfeltétele.

1.6.4 Gyors statikus mérés

A geodéziai alappontsűrítés klasszikus módszere. Kettő (vagy több) vevő mér egyidejűleg, statikusan, jellemzően 15-60 percig. A meghatározható vektorok hossza egyfrekvenciás vevőkkel max. 10-15 km, kétfrekvenciás vevőkkel max. 30-50 km. A nyers méréseket (kód és fázismérési adatokat) 5-15 másodperces mintavételi sűrűségben rögzítik a vevők, az adatokat utólag értékeli ki egy célszoftver. Legalább egy olyan pontot be kell vonni a mérésben, amelynek WGS84 rendszerű koordinátái ismertek (referenciapont). Referenciapont lehet OGPSH pont, vagy permanens állomás, utóbbi esetben a mérések utólag tölthetők le az internetről. Az utófeldolgozás során a referencia pont koordinátáit a WGS84 rendszerben adjuk meg, majd a szintén WGS84 rendszerben meghatározott koordinátákat transzformáljuk át EOVBalti (vagy EOMA) rendszerbe a következő fejezetben bemutatásra kerülő módon.

A gyakorlatban néha célszerű a méréseket úgy szervezni, hogy a referenciapont nem OGPSH pont, hanem az Egységes Országos Vízszintes Alapponthálózat (EOVA) valamelyik pontja, tehát a pont WGS84 koordinátáit nem ismerjük. Ilyenkor az utófeldolgozás során megköt-hetjük a referencia pont koordinátáit EOVB-ben is, de fokozottan figyelni kell a helyes transzformációra.

A vektorok mérésének ideje függ a vevőtől (egyfrekvenciás vagy kétfrekvenciás), a vektor hosszától, a mért műholdak számától, a műholdgeometriától, a mérési körülményektől, az ionoszféra állapotától. Nincsenek egyértelmű szabályok, itt a felhasználó személyes tapasztalataira kell hagyatkozni. Mivel az eredmények csak utólag értelmezhetőek, a legnagyobb igyekezet el-le nére is előfordul, hogy egy-egy vektort újra kell mérni.

A módszer előnye, hogy a terepi munkavégzés a lehető legegyszerűbb és a szükséges mérőfelszerelés nem túl drága. A hazai GNSS infrastruktúra jelenlegi állapotának köszönhetően, akár egyetlen egyfrekvenciás vevővel is lehet már hatékonyan dolgozni, az ország területének nagy részén akár 20-30 perces méréssel lehet egy pontot meghatározni. A módszer hátránya, hogy az eredményeket utólag kapjuk meg, és a valós idejű módszerekhez képest egy-egy pont meghatározása lényegesen több időt vesz figyelembe. Nem győzzük eleget hangsúlyozni, hogy az utófeldolgozás és a transzformáció magasan képzett szakembert igényel!

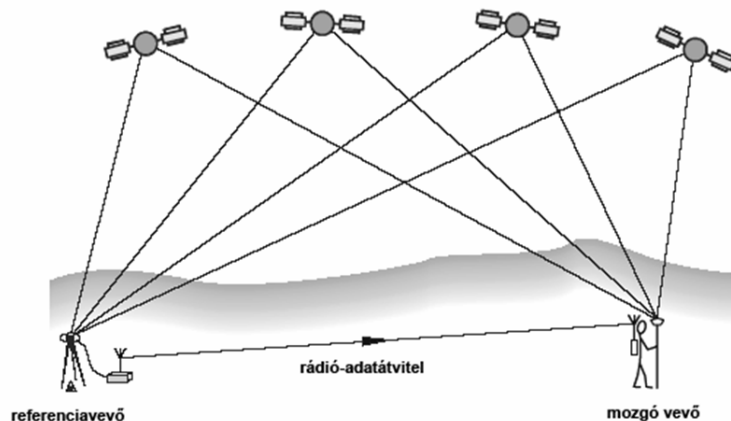
1.6.5 Félkinematikus mérés

Csak a teljesség kedvéért említjük meg. Lényege, hogy a bemérendő pontok felkeresése közben a vevőt nem kapcsoljuk ki, hanem az folyamatosan veszi a műholdak jeleit. A referencia-vevő folyamatosan mér, míg a mozgó vevővel az első ponton kell egy gyors statikus mérést végezni (ezt is inicializálásnak nevezi a szakirodalom), a többi ponton már elég néhány percet mérni. Tehát a módszer előnye, hogy egy-egy pont meghatározása lényegesen gyorsabb, hátránya, hogy a mozgó vevőnek nem szabad elvesztenie a kapcsolatot a műholdakkal. Ha ez mégis megtörténik, akkor újra kell inicializálni. További hátrány, hogy a mérés sikeressége, csak utólag derül ki.

1.6.6 RTK

Ez a *Real-time kinematic* (valós idejű kinematikus) kifejezés rövidítése. A gyors statikus mérés továbbfejlesztése, a ciklus-többértelműség feloldása nem utófeldolgozással, hanem valós időben történik. Ehhez a referenciavevő adatait valamilyen kommunikációs csatornán eljuttatjuk a mozgó vevőbe (*rover*). A ciklustöbbértelműséget menet közben (*on-the-fly*) oldja fel, a számításokat is a rover vevő végzi. A módszer nagy előnye, hogy az eredmények valós időben rendelkez-

zésre állnak, egy-egy pont meghatározása gyakran mindössze néhány másodperc, de jellemzően legfeljebb egy-két perc, illetve kitűzésre is használható. Hátránya, hogy a műszerek ára meglehetősen magas.



1-5. ábra Az RTK mérés

A referenciavevő lehet saját vevőnk egy ismert (pl. OGPSH) pontra telepítve, ilyenkor jellemzően a referencia és a mozgó vevő közötti kommunikáció rádióösszeköttetés útján valósul meg. A rádiók hatótávolsága átlagos terepi körülmények között néhány km.

Egy másik megoldás, amikor a referenciavevő egy aktív GPS-állomás, ebben az esetben a kommunikáció interneten zajlik. Az aktív állomás a méréseit elküldi egy szerverre, amelyről a mozgó vevő egy kliens program segítségével tudja az adatokat letölteni. A mozgó vevőnél GPRS kapcsolat segítségével célszerű az internetre csatlakozni. Aktív állomás esetén a referenciavevőt nem a felhasználónak kell üzemeltetnie, és a meghatározott vektor hossza akár 30-50 km-re is megnyújtható.

Egy harmadik megoldás szerint az aktív állomásokat összekapcsolják (hálózatba szervezik), adataikat együttesen kiértékelik, így lehetőség van az állomások közötti térbeli korrelációt figyelembe venni. Több módszer is ismert, ezek közül a legelterjedtebb módszer a **virtuális állomások** módszere. Az aktív állomások adatainak alkalmas interpolációjával a rendszer által lefedett területen tetszőleges pontban tudunk egy állomást szimulálni. A módszer nagy előnye, hogy kevesebb aktív állomással lehet ugyanazt a területet lefedni, illetve a felhasználónak rövid vektorokat kell mérnie, hátránya, hogy minden egyes felhasználó egy-egy független csatornát igényel a kapcsolattartásra.

2 A pontosság vizsgálata az antennák irányított mozgásával

Első lépésben a GPS-technikával elérhető pontosság meghatározására végeztünk több vizsgálatot. Ezek lényege, hogy a GPS-antennákat egy speciális eszközzel mozgattuk és a mozgás mértékét a GPS-től függetlenül szabatosan tudtuk mérni. A GPS-mérésekből levezethető koordinátákat ezután összehasonlítottuk a mozgítás hibátlan mértékével, így kaptuk meg a GPS-szel meghatározott koordináták (valódi) hibáit. A hibák statisztikai jellemzőivel becsülhető a technika pontossága.

A módszer alkalmas arra, hogy a pontosságot befolyásoló számos tényező hatását (műholdak száma és geometriája, feldolgozó szoftver, valós idejű, vagy utólagos feldolgozás... stb.) is megvizsgáljuk. Ezért méréseket végeztünk több különböző GPS-vevővel, ezeket a méréseket különböző szoftverekkel is feldolgoztuk, majd az eredményeket egymással összehasonlítottuk. Ezeken kívül megvizsgáltuk a feldolgozás különböző paramétereinek hatását az eredményekre. A következőkben bemutatjuk a legfontosabb munkarészeket és eredményeket.

2.1 Mérések egyfrekvenciás vevőkkel

Először egyfrekvenciás vevők pontosságvizsgálatát végeztük el. A mérésben a következő vevők vettek részt: 2 db. Geotracer 3140 vevő, 1 db. Trimble 4000 SE vevő és 1 db. Trimble 4600 LS vevő. Ezek a vevők mind egyfrekvenciásak.

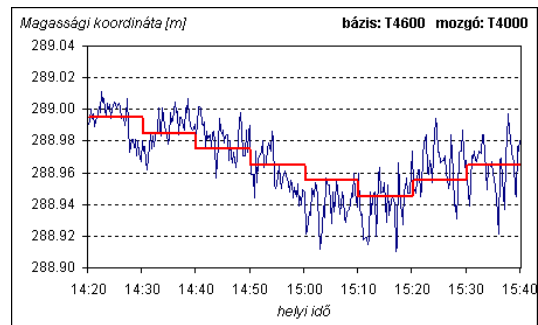
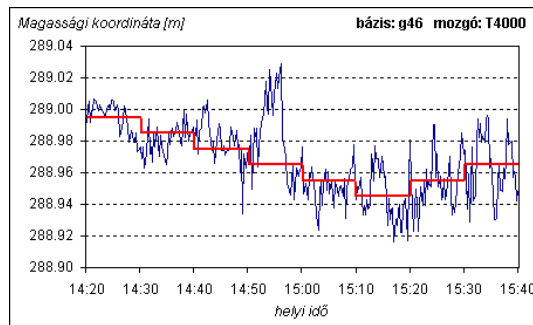
Az első méréseket a penci Kozmikus Geodéziai Obszervatórium (KGO) kertjében végeztük 2003. április 10-én. A mérések feldolgozásakor a penci permanens állomás adatait is használtuk. A mérés elrendezése a következő volt: a KGO épületének tetején helyeztük el a Trimble 4600 LS vevőt (T4600), a 103-as jelű pilléren az egyik Geotracer vevőt (G46), ezek voltak a bázisvevők. A 102. jelű pilléren helyeztük el a speciális mozgató berendezést, itt mértünk először a másik Geotracer vevővel (G51), majd a Trimble 4000 SE vevővel (T4000). A mozgó vevőket csak magasságilag mozgattuk, jöllehet a mozgató berendezésünkkel vízszintes értelemben is lehet az antennákat ismert pályán mozgatni. A méréseket minden vevővel 15 másodpercenként végeztük.

A mérések feldolgozását először Trimble Geomatics Office (TGO) 1.50 verziójával végeztük el. (Jelenleg a legfrissebb változat az 1.60-os, de ezzel sajnos nem rendelkezünk.) Első lépésben a permanens állomás mérései alapján levezettük a saját bázisaink koordinátáit (G46, T4600). Második lépésben pedig a mozgó vevő méréseit kinematikus mérésnek dolgoztuk fel. Az antennákat általában 10 percenként egy-egy centiméterrel mozgattuk el. Az antennák hibátlan helyzetét valójában nem, csak az első tíz perces mérésből levezetett helyzethez képesti elmozdulások hibátlan értékeit ismerjük. Mozgásvizsgálati mérések esetében ez megengedhető.

A vizsgálat céljai a következők:

- az egyfrekvenciás vevőkkel elérhető pontosság meghatározása;
- tapasztalatok szerzése a különböző típusú vevők és antennák együttes használatában.

A következő ábrákon összehasonlítjuk az antennák mozgáspályáját a GPS-szel meghatározott magassági koordináták és a mozgató berendezésen leolvasott értékek alapján.



2-1. ábra GPS-antennák mozgáspályája a GPS-mérések (kék) és a speciális mozgató eszköz (piros) alapján. A két ábrán a mozgó vevő (T4000) méréseit két különböző bázis vevő méréseit (G46 és T4600) felhasználva dolgoztuk fel

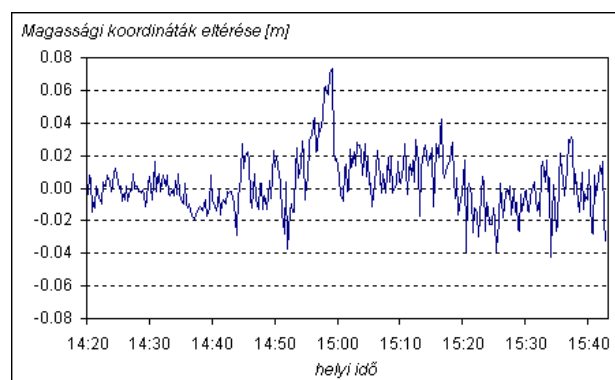
A GPS-mérésekből levezethető mozgáspálya a hibátlanak tekintett mozgáspályától a legkedvezőtlenebb esetben több, mint 6 cm-re eltér. A két mozgáspálya eltérése, valójában a GPS-mérésekből levezethető mozgáspálya hibájának statisztikai jellemzőit a következő táblázat mutatja be.

	G46-T4000	T4600-T4000
középérték	-0.001	0.001
középhiba	0.014	0.017
minimum	0.039	0.064
maximum	-0.044	-0.041

2-1. táblázat A GPS-mérésekből levezethető mozgáspálya hibáinak statisztikai jellemzői

A táblázat adatai alapján a korábban felsorolt vevőkkel, utófeldolgozással elérhető magassági értelmű pontosság kb. ± 15 mm-es középhibával jellemezhető. A többi mérés és a feldolgozás különböző esetei hasonló értékeket mutattak, ezeket hely hiányában nem közöljük.

Az előzőek alapján rögtön következik, hogy érdemes összehasonlítani a két különböző bázis alapján meghatározott magassági koordinátákat (azaz a különböző vevők és antennák együttes használatát), ezt láthatjuk a következő ábrán.



2-2. ábra A két különböző bázis alapján meghatározott magassági koordináták eltérése. Az eltérések számtani középértéke 2 mm, szórása ± 17 mm, a legnagyobb eltérés abszolút értéke 73 mm.

Az ábra alapján megállapítható, hogy jelentős, akár több cm-es eltérés is jellemezheti a koordináta-idősorokat, ha az egyes vevők méréseit különböző kombinációban dolgozzuk fel.

Később megismételtük a méréseket a Tanszék legújabb, RTK funkcióval is felszerelt vevőpárjával. A tapasztalatokat és feldolgozás egyes részleteit a következő fejezetben mutatjuk be. Itt térünk ki arra az alapvető kérdésre, hogy milyen eltérésekre számíthatunk, ha ugyanazon mérések feldolgozását különböző szoftverekkel is elvégezzük.

2.2 Mérések Leica SR530-as vevőpárral

A Leica SR530-as vevőpárral a méréseket 2003. augusztus 7-én végeztük el. A vizsgálat céljai a következők:

- utófeldolgozás és RTK mérés eredményeinek összevetése;
- mérések feldolgozása több különböző szoftverrel.

A mérésekhez most is az Observatórium kertjében található pillérek (102 és 103) használtuk. A mérést és a feldolgozást helyi rendszerben végeztük, hiszen a pontosságvizsgálat szempontjából a koordináta-rendszer közömbös. A mérés első szakaszában a mozgó vevő antennáját kerek cm-enként emeltük, majd süllyesztettük, összesen 5-5 alkalommal. Egy helyzetben 10 percig mértünk, a mérés során kihasználtuk a vevő RTK funkcióját, így összesen 11 statikus pont pozícióját határoztuk meg valós időben. Az RTK-val meghatározott koordinátákat és az elvileg hibátlan mozgáspályát a következő táblázat mutatja be.

Pontszám	Magasság [m]		Eltérés [m]
	RTK-mérésből	„kell” értéke	
101	286.3740	286.3696	-0.0044
102	286.3862	286.3796	-0.0066
103	286.3945	286.3896	-0.0049
104	286.3973	286.3996	+0.0023
105	286.4070	286.4096	+0.0026
106	286.4214	286.4196	-0.0018
107	286.4273	286.4096	-0.0177
108	286.3857	286.3996	+0.0139
109	286.3873	286.3896	+0.0023
110	286.3754	286.3796	+0.0042
111	286.3511	286.3696	+0.0185

2-2. táblázat Az antennák irányított mozgataása során valós időben meghatározott magassági koordináták

Az előző táblázatban bemutatott RTK-mérések pontossága magassági értelemben ± 10 mm-es középhibával jellemezhető, a legnagyobb eltérés abszolút értéke 19 mm körüli. Ezek a pontossági mérőszámok összhangban vannak a gyártó által közölt értékekkel, ugyanakkor valamivel kedvezőbbek, mint a „régí” műszerekkel kapott pontosság.

A következő részben ugyanerre az időszakra vonatkozó méréseket utófeldolgozással is kiértékeljük, így a 11 pont esetében lehetőség van a valós idejű és az utófeldolgozáson alapuló meghatározás összehasonlítására. Először az utófeldolgozást a Leica SKI-PRO v3.0 szoftverével végeztük el, később a méréseket más feldolgozó szoftverekkel is kiértékeljük.

2.2.1 Valós idő avagy utófeldolgozás

Az előző fejezetben bemutatott 11 pont utófeldolgozással (szoftver: Leica SKI-PRO) meghatározott koordinátáit a következő táblázat ismerteti.

Pontszám	Magasság [m]		Eltérés [m]
	SKI-PRO	„kell” értéke	
101	286.3748	286.3696	-0.0052

102	286.3871	286.3796	-0.0075
103	286.3954	286.3896	-0.0058
104	286.4000	286.3996	-0.0004
105	286.4052	286.4096	+0.0044
106	286.4220	286.4196	-0.0024
107	286.4204	286.4096	-0.0108
108	286.3947	286.3996	+0.0049
109	286.3945	286.3896	-0.0049
110	286.3782	286.3796	+0.0014
111	286.3531	286.3696	+0.0165

2-3. táblázat Az antennák irányított mozgataa során utófeldolgozáaa (aoftver: Leica SKI-PRO) meghatározott magaaági koordináták

Az utófeldolgozáaa meghatározott koordináták pontoaága ± 8 mm-es középhibával jellemzhető, a legnagyobb eltérés abszolút értéke 17 mm. **Vagyia az utófeldolgozáaa a pontoaág valamelyeat, mintegy 20 aázalékkal fokozható.** Megjegyezzük, hogy a feldolgozó aoftver a magaaági koordináták pontoaágát átlagoaan ± 4 mm-re beaüli, ugyanakkor az egyea koordináták valódi hibája jellemzően 6 mm (eltéréaek abszolút értékének aámtani középértéke azerint), de a legnagyobb eltérés eléri a 17 mm-et ia. **Vagyia a feldolgozó aoftver által meghatározott pontoaági mérőaáamok jelentőaen kedvezőbb képet mutatnak a valódi pontoaágánál.**

A teljeaaég kedvéért a következő táblázatban beaumatjuk a valós időben, illetve utófeldolgozáaa meghatározott magaaági koordináták eltéréaait ia.

Pontaáam	Magaaág [m]		Eltérés [m]
	SKI-PRO	RTK-mérésből	
101	286.3748	286.3740	-0.0008
102	286.3871	286.3862	-0.0009
103	286.3954	286.3945	-0.0009
104	286.4000	286.3973	-0.0027
105	286.4052	286.4070	+0.0018
106	286.4220	286.4214	-0.0006
107	286.4204	286.4273	+0.0069
108	286.3947	286.3857	-0.0090
109	286.3945	286.3873	-0.0072
110	286.3782	286.3754	-0.0028
111	286.3531	286.3511	-0.0020

2-4. táblázat Az antennák irányított mozgataa során utófeldolgozáaa (aoftver: Leica SKI-PRO) és valós időben meghatározott magaaági koordináták eltéréa

A 107, 108, 109 pontok kivételével az eltéréaek tulajdonképpen elhanyagolhatók, abszolút értékük keveaa, mint 3 mm. Egyelőre nem tudjuk, hogy a kérdéses három pont eaeében az eltérés miért kiemelkedő, de a pontoaágvizgálat azerpontjából eek ia minden bizonyal jellemzőek.

2.2.2 Különböző feldolgozó aoftverek öaazehaaonlítása

A következőkben ugyanezen 11 pont méréeait a Trimble Geomatica Office (TGO) 1.50 változatával ia feldolgoztuk, az így kapott koordinátákat a SKI-PRO eredményeivel a következő táblázatban aaonlítjuk öaae.

Pontszám	Magasság [m]		Eltérés [m]
	SKI-PRO	TGO	
101	286.3748	286.374	-0.0008
102	286.3871	286.387	-0.0001
103	286.3954	286.395	-0.0004
104	286.4000	286.398	-0.0020
105	286.4052	286.407	0.0018
106	286.4220	286.422	0.0000
107	286.4204	286.428	0.0076
108	286.3947	286.386	-0.0087
109	286.3945	286.388	-0.0065
110	286.3782	286.376	-0.0022
111	286.3531	286.351	-0.0021

2-5. táblázat Az antennák irányított mozgatása során utófeldolgozással különböző szoftverekkel (Leica SKI-PRO és TGO) meghatározott magassági koordináták eltérése

Az eltérések ± 4 mm-es középphibával jellemezhetők, a legnagyobb eltérés abszolút értéke 9 mm. Hely hiányában nem mutatjuk be, csak megjegyezzük, hogy

- a TGO-val kapott eredmények feltűnő hasonlóságot mutatnak a valós időben meghatározott koordinátákkal, az eltérések abszolút értéke gyakorlatilag 1 mm-nél kisebbek;
- az előzőből is következik, hogy a TGO-val meghatározott koordináták és a hibátlan értékek összehasonlítása ± 10 mm-es középphibával jellemezhető;
- vagyis a valódi hibák pontossága szempontjából még mindig a SKI-PRO mutatta a legkedvezőbb eredményeket.

Az összehasonlító vizsgálatot még egy feldolgozó szoftverrel, a Spectra Precision cég GeoGenius (GG) v 1.61 szoftverével is szerettük volna elvégezni, de a stop and go szerű mérés feldolgozása sajnos nem sikerült. A szoftver elvileg tartalmazza ezt a funkciót, de a feldolgozás nem jött össze. A későbbiekben fogunk még kinematikus méréseket több különböző szoftverrel is feldolgozni, akkor be tudjuk mutatni a GG-vel kapcsolatos tapasztalatainkat. A GG 1.60-os változata réginek tekinthető (1998), ezért a továbbiakban másik két, valamivel újabb szoftver eredményeire helyezzük a hangsúlyt.

3 GPS-technika alkalmazása hidak mozgásvizsgálatára a szakirodalomban

Hidak GPS-es mozgásvizsgálatával kapcsolatban érdekes tapasztalatokról olvashatunk számos külföldi szaklapban. A nottinghami egyetem kutatói két hídon végzett vizsgálatról számolnak be [Ashkenazi és társai, 1998]. Az első híd a Humber bridge, Anglia keleti partvidékén egy igen rugalmas szerkezet (három nyílása összesen mintegy 2200 méter hosszú, a kapuzatok magassága 155,5 m). A kísérleti mérések eredménye szerint a hídközép magassága átlagosan 150 mm-es amplitúdóval emelkedett, illetve süllyedt, a legnagyobb amplitúdó mintegy 450 mm volt. A hídközép, elsősorban a szél hatására, vízszintesen (a híd hossz tengelyére merőlegesen) is mozgott, a legnagyobb elmozdulás értéke elérte a 120 mm-t. A kísérletek során vizsgálták a kapuzatok tetejének mozgását is, ez azonban nem haladta meg a néhány cm-t. Érdekes lenne a hídközép és a kapuzatok egymáshoz viszonyított elmozdulását összehasonlítani és az összehasonlítás eredményét statikai számításokkal összevetni. Az említett cikkben vizsgált másik híd, a Clifton bridge Nottingham városában lényegesen merevebb szerkezet, mint a Humber bridge, hossza mindössze 240 m. A mérések azt mutatták, hogy a hídközép vízszintes értelemben nem mozgott, a legnagyobb lehajlás értéke elérte a 40mm-t. A szerzők vizsgálták a GPS mérések pontosságát is,

és megállapították, hogy a vízszintes összetevő középhibája ± 1 mm, a magassági összetevőé ± 3 mm.

A Humber bridge-hez hasonlóan rugalmas szerkezet Franciaországban, a Normandy bridge (hossza 2141m, ebből a középső nyílás 856m). A próbaterhelésekor kísérleti méréseket végeztek GPS-szel is [Leroy, 1995]. A mérések tapasztalatai szerint a vizsgált pont lehajlása 100 mm körüli volt. A szerző szerint a GPS jól alkalmazható hasonló feladatok elvégzéséhez annak ellenére, hogy igen nehéz körülmények között kellett a méréseket végezni, hiszen a GPS antennák közelében gyakran voltak kitakarást vagy visszaverődéseket okozó tárgyak.

A mozgásvizsgálatok egyik legérdekesebb alkalmazása a szerkezetek földrengésekkel szembeni ellenálló képességének vizsgálata. Tsakiri cikkében a görögországi Evripos csatornán átívelő kábelhíd mozgásvizsgálatának eredményeit foglalja össze [Tsakiri és társai, 2001]. A hídon a GPS mellett gyorsulásmérő műszereket is elhelyeztek, és a különböző mérési eljárások eredményeit összehasonlították. A területen gyakran észlelnek kisebb földrengéseket, ezek epicentruma a hídtól néha alig néhány km-re tehető. A gyorsulásérzékelők és a GPS folyamatosan rögzítik a mérési eredményeket, így lehetőség van a híd földrengésekre adott „válaszának” tanulmányozására.

Wong és társai tanulmányában egy teljes monitoring rendszert ismertetnek [Wong és társai, 2001]. Három igen hosszú (1377m, 1177m, 820m) hongkongi kábelhídon folyamatos mozgásvizsgálatot végeznek. A rendszer valós időben szolgáltatja a hidak mérésre kijelölt pontjainak pozícióit, így folyamatosan kimutatható a különböző terhelések (szél, hőmérséklet, forgalom okozta terhelések) hatása. A szerzők szerint a rendszer nélkülözhetetlen a hidak hosszú távú biztonságos üzemeltetése szempontjából.

4 GPS-mérések az Erzsébet hídon

4.1 Mérések a híd próbaterhelése során

A híd próbaterhelése idején a tervező intézet (UVATERV) mérnökei végeztek deformációméréseket. A mérésekkel egyidőben az ÉKME (a BME egyik jogelődje) Fotogrammetria Tanszékének munkatársai földi fotogrammetriai mérőképeket készítettek a szerkezetről [Kis Papp, 1965]. A kiértékelés során meghatározták a budai kapuzat billenését a csúcsnál (79 mm) a 2500 t járulékos teher hatására. Egy másik alkalommal megvizsgálták változtatlan terhelés (önsúly) mellett a szerkezet hőmérsékletváltozás hatására bekövetkezett mozgását: a szerkezeti hőmérséklet 10°C-os változásának hatására a budai kapuzat csúcsa vízszintes értelemben 11 mm-t mozdult el. A vizsgálat során mérték a szerkezet és a levegő hőmérséklete közötti különbséget is, megállapították, hogy a szerkezet hőmérséklete durván két órás késéssel követi a levegő hőmérsékletének változását.

4.2 GPS-mérések a pályázatot megelőzően

2001 nyarán egy külföldi vendéghallgató diplomatervéhez végeztünk GPS-méréseket sajnos, nem a legpontosabb vevőpárral (Geotracer 3140 vevők).

2002 nyarán egy RTK-vevőpárral (Trimble 5700) végeztünk kísérleti méréseket. Ez volt a hídon az első RTK mérés. A kedvező időbeli felbontásnak köszönhetően megvizsgálhattuk az egy-egy nehéz jármű (autóbusz) áthaladásakor fellépő dinamikus alakváltozásokat, illetve elmozdulásokat. Ekkor kaptuk először látványos bizonyítékát annak a korábbi feltételezésnek, hogy egy-egy autóbusz áthaladása a hídközép mintegy 5 cm-es lehajlását okozza és ezt GPS-szel ki lehet mutatni [Takács, 2002].

4.3 Az éves hőmérsékletváltozás

A pályázat egyik legfontosabb célkitűzései között szerepel, hogy az Erzsébet híd évszakos hőmérsékletváltozás okozta mozgásait kimutassuk. Tudomásunk szerint erre más még nem tett kísérletet. Nagyjából havi rendszerességgel végeztünk GPS-méréseket, a mérések időpontját és a mérés idején a jellemző hőmérsékletet a következő táblázatban foglaltuk össze.

2003. július 15. 11:05 – 12:10	23°C
2003. október 29. 9:25 – 11:30	3°C
2004. február 6. 12:05 – 12:35	15°C
2004. március 5. 13:35 – 14:45	0°C
2004. március 12. 13:35 – 14:45	8°C
2004. április 9. 13:30 – 14:50	14°C
2004. május 3. 14:55 – 16:10	20°C
2004. május 20. 14.45 – 13:25	24°C

4-1. táblázat Az Erzsébet hídi mérések időpontja (helyi idő) és a jellemző hőmérséklet. forrás¹

A mérések során a híd középso keresztszmetében, a kifolyási (déli) oldalon a járdában hilti szeggel állandósított pont magasságát határoztuk meg. Mozgásvizsgálati méréseinket a járdában állandósított pontok magassági koordinátáinak meghatározására korlátoztuk, a korábbi mérések tapasztalatai alapján a szerkezet vízszintes elmozdulásainak várható értéke mindössze néhány mm, ezt kinematikus GPS-mérésekkel kimutatni a jelenlegi technikai szinte nem lehetséges, hiszen a vízszintes mérések pontossága ezt nem teszi lehetővé. A vízszintes mérések szempontjára

¹ <http://hungarian.wunderground.com>

ből legizgalmasabb pont a kapuzat teteje, amely a GPS-mérések szempontjából ideális, de az antennák elhelyezése komoly gyakorlati nehézségekbe ütközik.

A bázisvevőt a pesti oldalon a híd alatti parkolóból feljövő lépcső tetejénél helyeztük el, a pontot szintén az aszfaltburkolatban hilti szeggel jelöltük meg. A bázispont koordinátáit minden alkalommal levezettük a BME permanens állomásáról is. A feladat szempontjából a BME állomás antennája mozdulatlanak tekinthető, ezt külön nem ellenőriztük. A bázisponton álló vevőt mutatja a következő fotó.

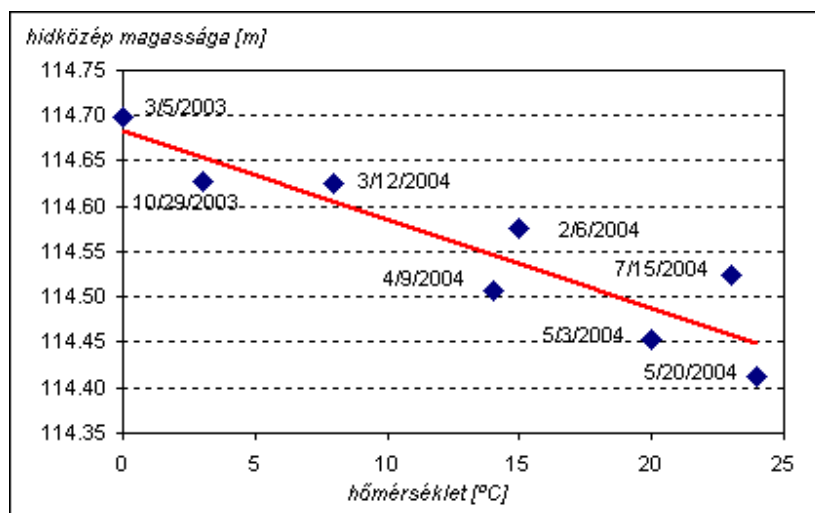
A mérések elvégzéséhez elvileg két vevő is elegendő (egy bázis, egy rover). Minden méréskor ugyanazt a vevőpárt, a Tanszék legpontosabbnak ítélt vevőit alkalmaztuk (Leica SR530). Általában nem használtuk ki a vevők RTK funkcióját, vagyis a méréseket utólag dolgoztuk fel. A feldolgozást TGO-val végeztük, de több alkalommal is – elsősorban ellenőrzés végett – a méréseket más szoftverekkel (GeoGenius, SKI-PRO) is feldolgoztuk. A tapasztalatok szerint a hídközép magasságát a különböző szoftverekkel gyakorlatilag ugyanúgy, 1-2 cm-es eltérésekkel lehet meghatározni. Később látni fogjuk, hogy a meghatározás, elsősorban a forgalom okozta dinamikus terhelés miatt számos bizonytalanságot tartalmaz, ezért a feladat szempontjából a feldolgozó szoftverek közötti különbség elhanyagolható.

A méréseket jellemzően tized-másodpercenként rögzítettük. Tekintve, hogy a mozgásvizsgálati pont a forgalom hatására állandóan mozog, ezért a méréseket kinematikus mérésként dolgoztuk fel, az évszakos hőmérsékletváltozás hatása szempontjából (jobb híján) jellemző értéknek a koordináták számtani középértékét tekintettük. Az így meghatározott magasságokat a következő táblázat mutatja be.

2003. július 15.	23°C	114.524
2003. október 29.	3°C	114.628
2004. február 6.	15°C	114.576
2004. március 5.	0°C	114.698
2004. március 12.	8°C	114.626
2004. április 9.	14°C	114.507
2004. május 3.	20°C	114.453
2004. május 20.	24°C	114.413

4-2. táblázat A hídközép magassága (Balti rendszerben) az idő és a jellemző hőmérséklet függvényében.

A 4-2. táblázatban bemutatott értékeket a jobb áttekinthetőség érdekében a következő ábrán ábrázoltuk. A kék pontok felelnek meg a diszkrét időpontban meghatározott magasságoknak, ezekre illesztett regressziós egyenes a piros vonal.



4-1. ábra A hídközép magassága az idő és a jellemző hőmérséklet függvényében

Az eredmények alapján a következő fontos következtetések vonhatók le:

1. a legnagyobb magasságkülönbség 28,5 cm. Ehhez az értékhez a levegő jellemző hőmérsékletének különbsége 24°C. Vagyis az évszakos hőmérsékletváltozás hatására a hídközép magassága több dm-et változik.
2. az azonos hőmérsékletre nem mindig tartozik azonos magasság, az eltérés jópár cm is lehet. Ennek oka feltehetően a napi hőmérsékletváltozás, illetve a szerkezet hőmérsékletének és a levegő hőmérsékletének eltérése. Ezért később megvizsgáljuk, hogy a pillanatnyi hőmérséklet helyett vajon a megelőző időszak középhőmérséklete mennyivel erősíti a hőmérséklet és magasság közötti korrelációt. Sajnos a szerkezet hőmérsékletét mérni szinte lehetetlen.
3. különösen érdekes, hogy a 2003. július 15.-i és a 2004. május 20.-i mérések idején nagyjából azonos évszakban és azonos hőmérséklet mellett a hídközép magassága 11 cm-et eltér. Ennek okát egyelőre nem tudjuk, de a pályázat lezárása után 2004. júliusában is tervezünk további méréseket. Megjegyezzük, hogy a 2001. nyarán végzett mérések a 2003. évi nyári méréssel mutatnak összhangot.

4.4 A napi hőmérsékletváltozás

4.4.1 5x1 órás mérési periódus egy napon, különböző napszakokban

Az előző fejezetben láttuk, hogy a hídközép pont magassága az évszakos hőmérsékletváltozás hatására 1°C-onként mintegy 1.2 cm-et változik (hőmérséklet csökkenés esetén megemelkedik). Láttuk, hogy a magasság és a hőmérsékletváltozás közötti kapcsolat a lineáris összefüggésnél valamivel összetettebb (lásd a 4-2. ábrán a pontok regressziós egyenesre való illeszkedésének bizonytalanságát). Említettük, hogy ennek egyik oka lehet a napi hőmérsékletváltozás hatása, egy forró nyári napon a napi hőmérsékletváltozás elérheti a 15-20°-ot is, a szerkezet hőmérsékletváltozása ennél valamivel szerényebb, de az eddigi tapasztalataink szerint mindenképpen kimutatható.

A hatás megbízható tanulmányozása érdekében több, folyamatos 24 órás mérésre lenne szükség. Ehhez szükséges felszereléssel sajnos nem rendelkezünk, ezért arra vállalkoztunk, hogy egy napon 5x1 órás mérést végeztünk különböző napszakokban. A mérésre a pályázatot megelőzően, 2001. július 3-án került sor, a méréseket eddig még nem dolgoztuk fel, az eredményeket

sem publikáltuk. Erre most kerül sor. A következő táblázatban foglaltuk össze a mérések időtartamát és a hőmérsékletet.

periódus jele	mérési idő
a	4:20 – 5:20
b	8:10 – 9:10
c	13:05 – 14:05
d	16:10 – 17:10
e	19:51 – 20:51

4-3. táblázat Az Erzsébet híd mérési időpontja.

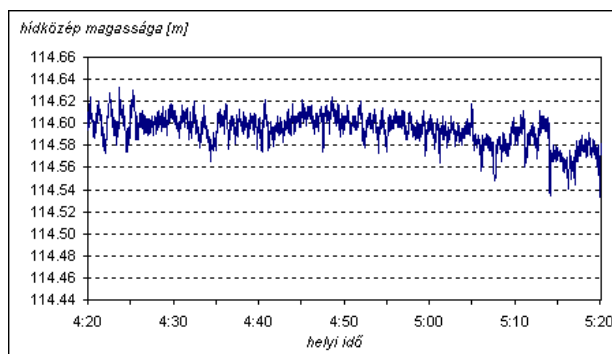
A méréseket a tanszék akkori legkorszerűbb vevőivel (Geotracer 3140) végeztük, bázispontként a budai oldalon, a vízesés előtti virágágyásban megjelölt pontunkat használtuk. A méréseket másodpercenként rögzítettük. Ezt a pontot a korábbi vizsgálatokhoz való illeszkedés érdekében szintén a BME permanens állomásáról vezettük le. Az adatokat első lépésben a vevők „saját” szoftverével (GG) próbáltuk meg kiértékelni, de sajnos az öt mérési periódusból a középsőt (c) a szoftver nem tudta kiértékelni. Ennek oka a periódus első szakaszában a gyenge műholdgeometria.

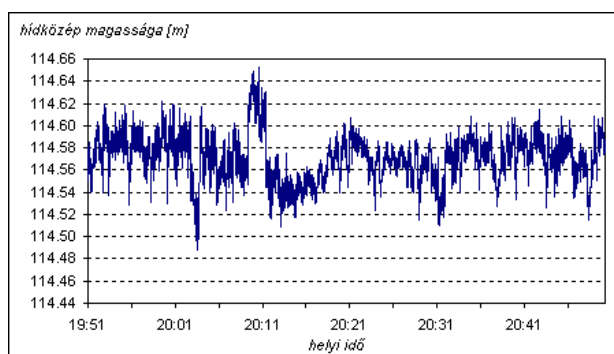
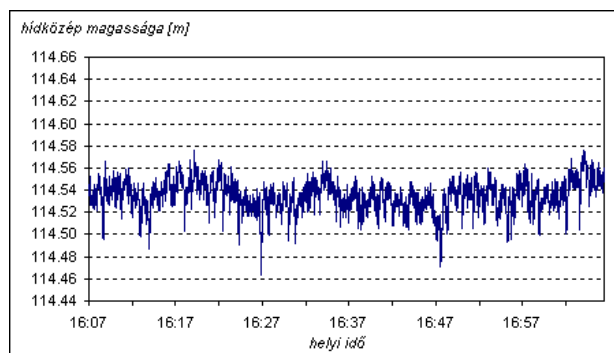
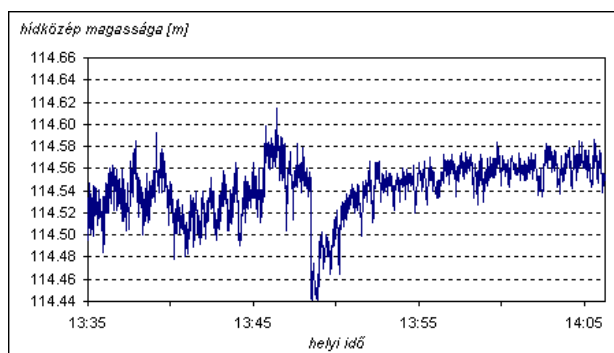
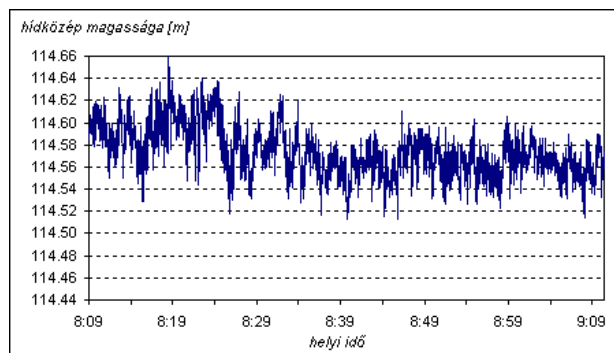
A GG után próbálkoztunk a TGO-val, amivel az összes periódust fel tudtuk dolgozni, bár a c-jelű periódus esetében a mérési szakasz első felét a további értelmezésből kihagytuk, mivel *float* megoldást kaptunk, és a magassági koordináták változása elérte a 0,5 métert is. Ebből az következik, hogy kedvezőtlen műholdgeometria vagy más külső körülmények (pl. többutas terjedés) hatására a GPS-mérések feldolgozása nehézségekben ütközhet. A további felhasználás érdekében ez nagyon fontos tapasztalat: a GPS-mérések nem mindig értéklehetők ki.

A következő táblázatban összefoglaltuk az öt mérési periódus fontosabb jellemzőit, majd az ezt követő ábrán bemutatjuk a magassági idősorokat.

periódus jele	közepes magasság [mBf]	magassági idősorok szórása [mm]	kiértékelt pozíciók száma
a	114,594	±14	3609
b	114,574	±22	3685
c	114,542	±25	1875
d	114,535	±14	3564
e	114,570	±21	3557

4-4. táblázat 2001. július 3-án végzett mérési periódusok fontosabb jellemzői





4-2. ábra 2001. július 3-án a hídközép magassága különböző napszakokban

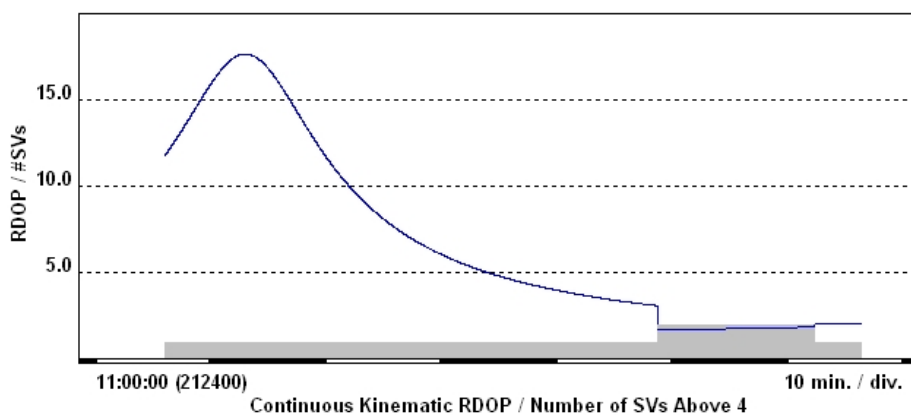
Az előbbi ábrák és a 4-4. táblázat alapján néhány nagyon fontos következtést vonhatunk le:

- feltehetően a napi hőmérsékletváltozás hatására a hídközép közepes magassága a hajnali leghűvösebb periódushoz képest mintegy 6 cm-et csökkent a délutáni legmelegebb periódus idején. Ez is jól mutatja, hogy a szerkezet hőmérséklete a levegő hőmérsékletét csak néhány órás késleltetéssel követi.
- Az idősorok trendje is megfelel a várakozásnak (a hőmérséklet növekedéséhez lehajlás tartozik), ez leginkább az első két periódushoz tartozó ábrákon látszik.
- Az idősorok szórása és a jellemző forgalmi terhelés közötti kapcsolat is jól látszik, pl. az első periódusban lényegesen kisebb a szórás, mint a második periódusban, a reggeli csúcsforgalom idején.
- Az idősorokban jól megfigyelhetők olyan szakaszok, amikor a mérést és/vagy a feldolgozást különböző hibák terhelik, pl. 13.48 körül vagy 20:10 körül. Ezek a szakaszokon látható koordinátaugrásokat semmiképpen sem okozhatja a híd mozgása. A jelenség magyarázata minden bizonnyal a műholdgeometriában keresendő, ezzel a kérdéssel később még foglalkozunk.
- Az idősorokban látható lokális minimumokat (legszebben ez a d jelű periódusban látható) feltehetően rövid ideig tartó terhelések okozzák (pl. autóbuszok áthaladása), ezzel foglalkozunk a következő fejezetben.

4.5 A műholdgeometria és a pontosság összefüggése

A műholdgeometria jellemzésére a szakirodalomban a pontosság hígulás, angol nevén Dilution of Precision, DOP fogalma szolgál. Ennek több változata ismert, az abszolút helymeghatározás geometriai pontosságának jellemzésére leggyakrabban a PDOP-ot használjuk. A relatív helymeghatározás szempontjából a relatív DOP (RDOP) érdekes, ennek értékét a TGO a műholdak számával együtt adja meg.

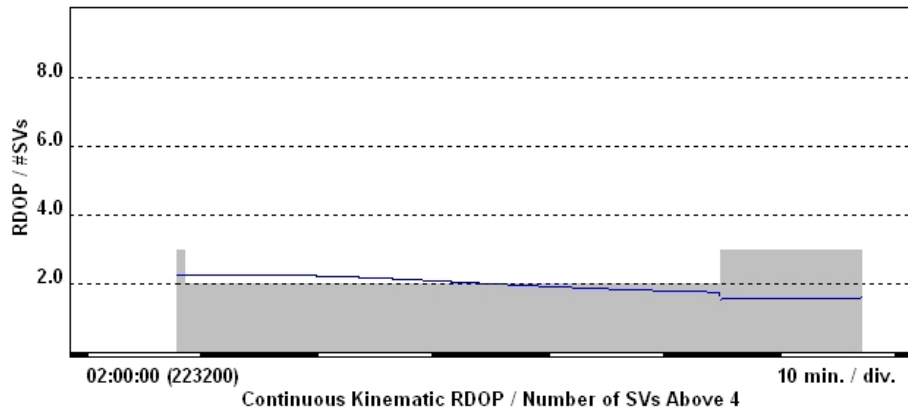
Az idősorok alapján kiválasztottunk két jellemző periódust, a c és a d jelűeket, előbbi gyenge, utóbbit erős műholdgeometriával jellemezhetjük. A következő két ábrán láthatjuk a műholdak számát és a relatív DOP értékeket. Az ábrákon a vízszintes tengelyen az idő GPS-rendszerben van feltüntetve.



4-3. ábra RDOP és műholdak száma a c jelű periódusban

Jól látható, hogy a c jelű periódus elején az RDOP értéke igen magas, eléri a 17-et is. Minden bizonnyal ez az oka annak, hogy az inicializálás a GG-vel nem sikerült, illetve, hogy a TGO eredményeiből az első szakaszt kihagytuk a további értelmezésből. Az 5-1. ábrán a c periódust csak 13.35 –től ábrázoltuk, ennek az időpontnak durván 5 körüli RDOP érték felel meg. Érdekes, hogy az 5-1. ábrán 13:48 körül látható ugrás nem hozható összefüggésbe sem a műholdak számával, sem a műholdgeometriával. A könnyebb összehasonlítás érdekében a következő ábrán

bemutatjuk a d jelű periódust is, ekkor az RDOP 2 körüli. Megjegyezzük, hogy a műholdak száma önmagában nem jellemzi a műholdgeometriát, hiszen mindkét bemutatott periódus nagy részében ez 6.



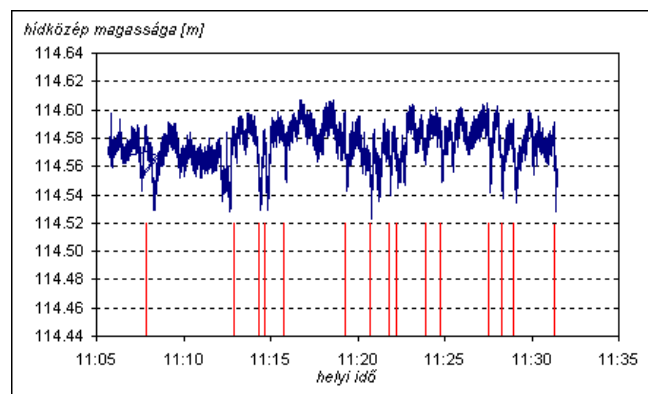
4-4. ábra RDOP és műholdak száma a d jelű periódusban

Megjegyezzük, hogy statikus mérések esetén a műholdgeometria hatása általában a kelően hosszú mérési idő megválasztásával csökkenthető. A kinematikus mérések esetében erre nincs lehetőség. A kutatások és fejlesztések egyik további lehetséges iránya az inicializáló algoritmusok további hegyezése, hogy a gyenge műholdgeometria esetében is fel lehessen dolgozni a méréseket. Láttuk, hogy ebben a tekintetben az egyes feldolgozó szoftverek között is jelentős különbségek tapasztalhatóak.

4.6 A forgalom okozta terhelés

4.6.1 A hídközép magasságának változása és az áthaladó autóbuszok

A forgalom okozta terhelés kimutatása érdekében először bemutatjuk a számos kinematikus mérés egyik jellemző idősorát. A következő ábrán a 2004. február 6-i mérés idősorát ábrázoltuk, a kék vonal jelöli a magassági koordinátákat, a piros függőleges oszlopok pedig a hídon Budáról Pestre az autóbuszok áthaladásának időpontját. A magassági koordináták utólagos feldolgozásból származnak, a számításához a TGO szoftvert használtuk.



4-5. ábra A hídközép pont magassága GPS-mérésekből és az áthaladó autóbuszok

Az ábrán nagyon jól látszik, hogy

- a magassági koordináták mintegy 8 cm-es sávban változnak, ez valamelyest nagyobb, mint a technológia jellemző pontossága;
- a lokális minimumok időpontjai meggyőzően egybe esnek a buszok áthaladásának időpontjával.

Sajnos a vizsgálatainknak alapvető korlátja, hogy a forgalom rögzítése egyelőre nem megoldott. Legtöbbször azt a megoldást alkalmaztuk, hogy a legfontosabb terhelést okozó autóbuszok áthaladásának időpontját felírtuk. Ennek a módszernek több hátránya is van, egyrészt az információgyűjtés módja nem teljes (a személygépkocsik torlódnak vagy nem; a buszok típusa... stb), másrészt a módszer nem automatizálható. Kísérleteket végeztünk a hídon a zajmérésre ez alapján sajnos a forgalom utólag nemigen állítható vissza. Megoldást az jelentene, ha videokamerák segítségével rögzítenénk a forgalmi viszonyokat, ahogyan azt korábban Hajós Bence is tette. Erre nekünk egyelőre nem volt lehetőségünk.

Az adott forgalmi szituáció és a magassági koordináták közötti korrelációt legmeggyőzőbben valós idejű mérések alapján ellenőrizhetjük, erre számos alkalommal voltak kedvező tapasztalataink.

4.6.2 A híd különböző pontjainak magassága közötti összefüggés

A fejezetben bemutattuk, hogy az évszakos hőmérsékletváltozás hatására a pályázat keretében összesen nyolc alkalommal végeztünk méréseket a híd közép, a déli oldalon állandósított ponton. Ezek közül az alkalmak közül többször is végeztünk párhuzamosan méréseket további pontokon is: a híd közepén az északi oldalon, illetve a déli oldalon több ponton is. Minden pont esetében a magassági elmozdulások kimutatását céloztuk meg. Ebben a fejezetben bemutatjuk az egyes mozgásvizsgálati pontok magassági koordináta-idősorainak kapcsolatát, ezek közötti összefüggés vélhetően hasznos információval szolgál a szerkezet összetett mozgásainak kimutatásában.

4.7 Kinematikus mérések feldolgozása különböző szoftverekkel

A mérési technológia pontosságának vizsgálata során már foglalkoztunk azzal a kérdéssel, hogy vajon ugyanazon méréseket különböző szoftverekkel dolgozzuk fel, akkor a kapott koordináták mennyire térnek el egymástól. A 3. fejezetben stop and go jellegű méréseket dolgoztunk fel TGO-val és SKI-PRO-val, most ezt a vizsgálatot kinematikus mérések esetében is elvégezzük az összes rendelkezésünkre álló szoftverrel: TGO, SKI-PRO, GG.

A számos mérés közül a 2004. május 20-án végzett mérésünket dolgozzuk fel, a mérést Leica SR530-as vevőkkel, tizedmásodperces sűrűséggel végeztük. Szerencsére a feldolgozás mindhárom szoftverrel gyakorlatilag azonnal sikerült, a feldolgozáshoz – amennyire ez lehetséges – ugyanazokat a paramétereket állítottuk be (pl. 10°-os magassági kitakarási szög).

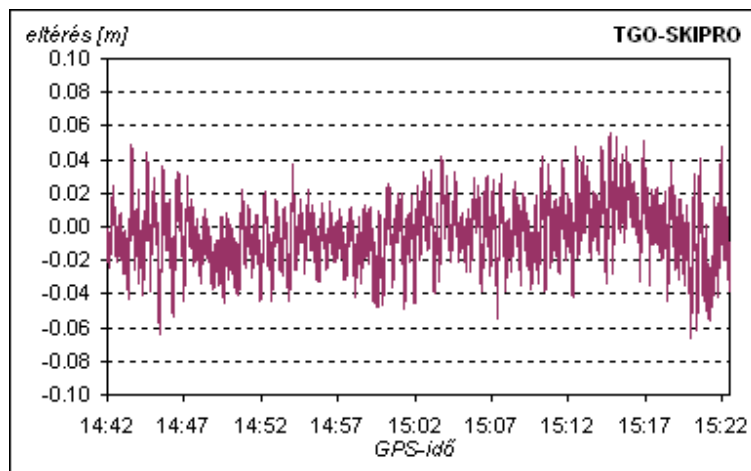
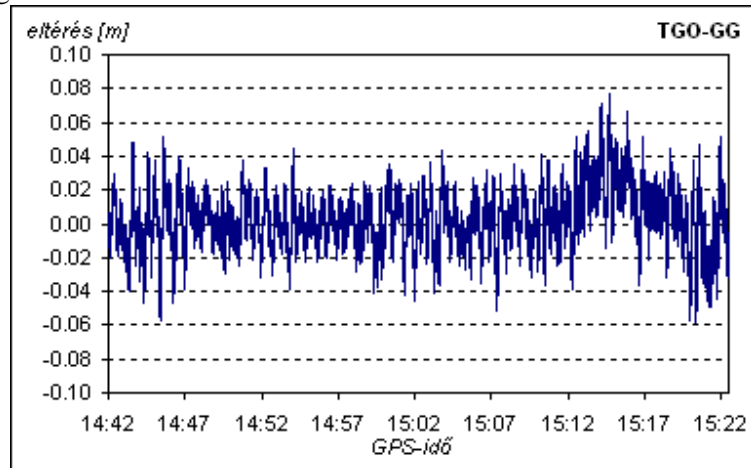
A következő táblázatban az eltérések statisztikai jellemzőit foglaltuk össze, ezután az eltéréseket grafikonon is ábrázoljuk.

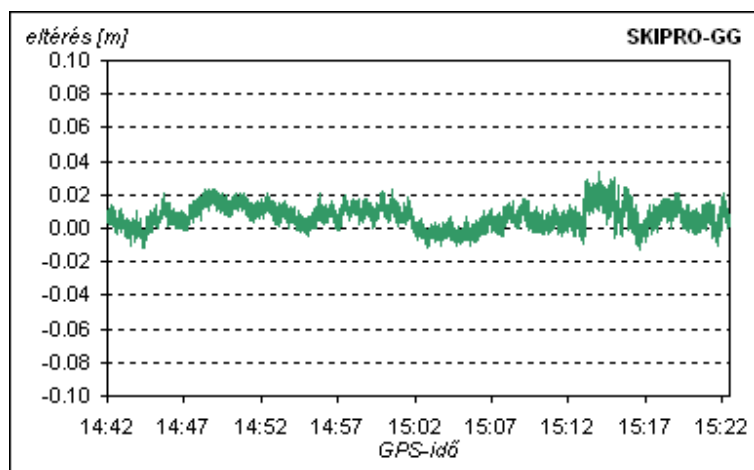
	TGO-GG	TGO-SKIPRO	SKIPRO-GG
számtani közép	+0,003	-0,004	+0,007
szórás	±0,017	±0,017	±0,007
max	-0,058	-0,066	-0,013
min.	+0,077	+0,056	+0,034

4-5. táblázat Kinematikus mérések feldolgozása különböző szoftverekkel, a magassági koordináták eltéréseinek statisztikai jellemzői.

A táblázat adatai alapján elmondhatjuk, hogy ha a mozgó pontok számtani középértékét keressük (mint pl. az évszakos hőmérsékletváltozás hatásának tanulmányozásakor a 4. fejezetben), akkor a nincs lényeges különbség az egyes feldolgozó szoftverek között, hiszen a számtani középértékek 1 cm-en belül azonosak. A szórások és a maximális/minimális eltérések tekintetében már vannak jelentős különbségek, mindezt jól érzékeltetik a következő ábrák.

Az ábrák alapján a SKI-PRO és a GG szoftverek eltérései a legkisebbek, ezek jellemzően 2 cm-nél kisebbek, de a legnagyobb eltérés is csak 34 mm. Ugyanakkor a TGO eredményei a másik két szoftver eredményeitől ennél lényegesen jobban eltérnek, az eltérések jellemzően 4 cm alattiak, de a legkedvezőtlenebb esetben elérik a 8 cm-t is.





4-6. ábra Kinematikus mérések feldolgozása különböző szoftverekkel, a magassági koordináták eltérései

5 Mérések a Hosszúrévi Sajó híd betolásánál

Az RTK vevőpár alkalmazhatóságát szerencsés körülmények folytán élesben is kipróbálhattuk a Hosszúrévi Sajó híd építésének egyik fázisában. A kb. 100m hosszú hidat a folyó partján szerelték össze, majd az így elkészült hídelemet egy darabban tolták a végleges helyére. A hídelem és a mozgatás mértéke nem kívánja meg a tolás szabatos geodéziai irányítását, ilyen kis méretű híd esetén mindezt viszonylag egyszerű geodéziai műszerekkel (teodolittal, szintezőműszerrel) és egyszerű geodéziai mérési módszerekkel is meg lehet oldani.

Az RTK vevőpár tesztelése érdekében néhány napig végeztünk bizonyos tesztméréseket, ennek során számos tapasztalatot szerezhettünk. Ezek közül néhány:

- a technológiával elérhető pontosság a feladathoz megfelelő;
- célszerű a tolópadok elhelyezését geodéziai módszerekkel és pontossággal irányítani, ez a hídelem tolásakor megtérül;
- A vevőpárhoz gyárilag szállított akkumulátorokkal nem lehet 8 óránál hosszabb méréseket végezni, a vevők áramellátását más módon is meg kell oldani.

6 Mérések a dunaújvárosi híd építésénél

6.1 Mérések 2005. november 30-án

A jobbparti ártéri híd elemeinek beemelése és helyére tolása 2005. őszén kezdődött. A tolás végén már több száz méter hosszú ártári híd tolásához mindenképpen szabatos geodéziai építésszervezésre van szükség. Ennek GPS-technikán alapuló módszerét dolgoztuk ki a pályázat keretében és sikerrel teszteltük ezt.

A módszer röviden a következő. A hídelem jellemző pontjaira RTK mozgó vevőket telepítünk. Jellemzően 3-4 mozgó vevőre van szükség, ezeket a hídelem hosszán egyenletesen célszerű elosztani. Valahol a parton, lehetőleg egy, az építkezés rendszerében szabatosan meghatározott és stabilan állandósított ponton (mérőpilléren) célszerű elhelyezni. A mozgó vevők ehhez a referenciához képest határozzák meg magukat. Egy referencia vevő természetesen több mozgó vevőt is képes kiszolgálni. A mozgó vevők korábbi tesztjeink és tapasztalataink szerint egy-két centiméteres pontossággal tudják helyzetüket meghatározni, ez a pontosság a feladat szempontjából elegendő. A mozgó vevők folyamatosan küldik koordinátaikat egy, a központi irányítást végző számítógép felé. Az adattovábbítás történhet valamilyen kommunikációs rádióon, vagy kábeleken. A központi számítógép tehát valós időben (másodpercenként) gyűjti az összes mozgó vevő pillanatnyi pozícióját, amelyből megállapítja a hídelem pillanatnyi helyét, helyzetét („van” mozgás). Ezt összehasonlítja a tervezett („kell”) mozgáspályával. A két mozgáspálya eltérése hasznos információt jelent a tolás vezérlése szempontjából.

Tesztmérésünk során kipróbáltuk mindezt hagyományos geodéziai technikával (mérőállomásokkal) is. A mérőállomások elvileg alkalmasak a feladat elvégzésére, a hídelemeken prizmákat kell elhelyezni, amelyeket aztán a parton telepített mérőállomások folyamatosan mérnek, a korszerű eszközök birtokában lényegében teljesen automatikusan. Sajnos automata mérőállomások tesztelésére nem nyílt lehetőségünk, maradtunk tehát a hagyományos (Sokkia PowerSet) mérőállomásoknál. Vizsgáltuk a mérőállomással és a GPS-szel meghatározott mozgáspályák eltéréseit és megállapítottuk, hogy a szükséges pontosságon belül ezek azonosnak tekinthetők. Legfontosabb gyakorlati tapasztalataink a következők:

- Mérőállomásokat alkalmazva nagyon nagy problémát jelent a műszerek és a prizmák összeláthatósága. A szokás körülmények között számos tereptárgy akadályozhatja az összelátást, ezért a műszerek és a prizmák telepítését gondos tervezésnek kell megelőznie. Feltétlenül szükséges, hogy jóval több műszert és prizmát telepítsünk, mint amennyire elvileg szükség van.
- Mérőállomások alkalmazásának egyik legfőbb korlátja az időjárásfüggés. Feladatunkhoz gyakran néhány száz méteres, vagy esetleg még hosszabb távolságok mérése szükséges, magyarországi körülmények között az időjárás (köd, párásság... miatt) a látástávolság, különösen folyóvizek felett jelentősen lecsökkenhet. (Geodéziai meteorológia tudománya szerint az egyértelmű irányzáshoz, pontazonosításhoz a látástávolság legyen a mérendő távolság legalább háromszorosa!)
- A mérőállomásokon alapuló módszer még a legkorszerűbb eszközök esetében sem automatizálható teljesen.

6.2 Mérések 2006. december 16-án

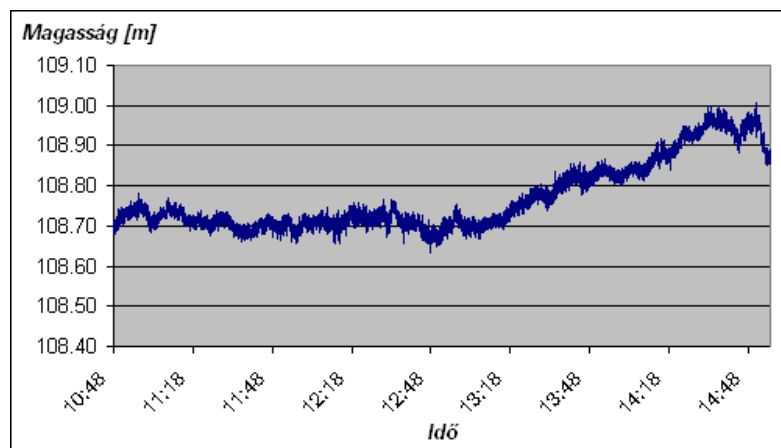
A kb. 8500 t tömegű és 307,6 m hosszú mederhíd a Duna jobb partján, szerelőállványon készült el 98,3 mBf magasságon. A végleges beépítési pozíció erre a helyzetre kb. merőlegesen, mintegy 150 m távolságra és a 107,7 – 112,2 mBf magasságban helyezkedik el. Így a szerkezet összeszerelését követően szükséges volt a híd megemelése (3 lépcsőben), valamint vízszintes mozgatása (beúsztatása).

A beúsztatás végén a hidat a pillérekre helyezték, majd elkezdődött az emelés.



6-1. kép Mozgó vevő a mederhídon emelés közben

A következő mérésre 2006. december 16-án került sor. Ekkor a mederhidat már beemelték a pillérekre, egyelőre még nem végleges magasságra. A mederhidat mintegy 9 méterrel kell tehát felemelni, ennek építéssirányítási feladataiba kapcsolódtunk bele. Egy referenciavevőt telepítettünk a partra, amelyhez képest határoztuk meg két mozgó vevők helyzetét. A mozgó vevőket a mederhíd két végén helyeztük el.



6-1. ábra Mozgó vevő magassága a mederhíd emelése közben

Az ábrán az egyik mozgó vevő magasságát láthatjuk az emelés közben. Az ábrán jól látható az emelés egyik, kb. 25-30 centiméternyi értéke.



6-2. kép Referenciavevő az ártári hídon

7 Irodalom

Ashkenazi V., A.H. Dodson, G.W. Roberts (1998): Real Time Monitoring of Bridges by GPS. XXI. International FIG Congress, 1998. July 19-25, Brighton, UK

Ádám J., Bányai L., Borza T., Busics Gy., Kenyeres A., Krauter A., Takács B. (2004): Műholdas helymeghatározás. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004.

Busics Gy, Horváth T (2006): Az aktív hálózatok adottságainak kihasználása a műholdas helymeghatározásban. Geodézia és Kartográfia, 4, 9-16.

Busics Gy. (2007): Technológia-váltás a GNSS korszakban, Geomatikai Közlemények, X, megjelenés alatt

Hajós B. (1999): Az Erzsébet híd hőmérsékletváltozás okozta mozgásának vizsgálata. TDK dolgozat, BME.

Hajós B. és Takács B.: Egy híd lélegzése – avagy a forgalom alatti mozgásvizsgálatról. Közúti és mélyépítési szemle, 2003/7

Horváth T. (2006): GNSS modernizáció, Tea előadás Penc, 2006. június 1.¹

Hugentobler, U., Schaer, S., Fridez, P. (2001): Bernese GPS Software Version 4.2 (Astronomical Institute, University of Berne)

Husti Gy., Ádám J., Bányai L., Borza T., Busics Gy., Krauter A. (2001): Globális helymeghatározó rendszer (bevezetés). Második, javított kiadás, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 2001.

Kis Papp L. (1965): Az Erzsébet híd mozgásvizsgálata fotogrammetriai módszerrel, Geodézia és Kartográfia.

Krauter A. (1995): Geodézia. Egyetemi jegyzet. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1995.

Krauter A. (2002): Geodézia. Egyetemi jegyzet (az 1995. évi kiadás átdolgozott és bővített változata). Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2002.

Leroy E. (1995): GPS Real-time Levelling on the World's Longest Suspension Bridge. 1995

Mnyerczán A. (2003): A GPS-technika alkalmazása hidak mozgásvizsgálatánál. Diplomaterv, BME.

Szűcs L., Sz. Rózsa, T. Tokos. (2000): Tectonical Movement Examination by GPS, Gravimetric and Traditional Measurements, Research News, Technical University of Budapest, 2000/1

Takács B. (2002): Az Erzsébet híd mozgásvizsgálata, elektronikus publikáció².

¹ <http://www.sgo.fomi.hu/files/GNSS-modernizacio-01062006.pdf>

² <http://www.gps.hu/index.php?id=175>

Tsakiri M, V. Leikidis, M. Stewart (2001): GPS for monitoring cable-stayed bridges in seismic areas. Presented at the “Vistas for Geodesy in the New Millennium” IAG Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2-7 September 2001

Wong K., K. Man, W. Chan (2001): Monitoring Hong Kong's Bridges. GPS World, 2001, Vol. 12., No. 7. pp. 10-18